

大坝温度及抗裂性能 受通水冷却方式影响研究

颜亮亮, 刘云中

(连云港市金河水利工程建设监理有限公司, 江苏 连云港 222000)

摘要: 大坝在施工和服役期间, 由于水泥水化热引起的内部温度变化, 容易导致结构开裂, 影响其长期稳定性和安全性。通过建立大坝数值模型, 分析大坝混凝土温度应力和温度受通水冷却时间、冷却管布设方式以及通水分期的影响趋势, 研究结果表明: 减小冷却水管间距有利于控制混凝土的最高温度, 减少温度应力, 提升坝体抗裂能力; 需结合工程现场实际情况选择一期通水水温时, 在保证混凝土降温的同时, 最大程度上减小水管附近温差, 避免混凝土开裂; 一期冷却时长控制在20d较为合理, 既能有效控制温度和应力, 又能平衡好开裂风险, 确保大坝结构的长期稳定性和安全性; 建议在冬季前对夏秋季高温阶段浇筑的混凝土合理开展中期冷却, 确保在不增加早期阶段过多应力的前提下, 最大程度地降低混凝土内部温度。

关键词: 大坝; 水泥水化热; 温度应力; 通水冷却; 混凝土开裂

中图分类号: TV554 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839(2024)10-0024-0004

Research on the influence of water cooling methods on the temperature and crack resistance performance of dams

YAN Liangliang, LIU Yunzhong

(Lianyungang Jinhe Water Conservancy Engineering Construction Supervision Co., Ltd.,
Lianyungang 222000, China)

Abstract: During the construction and service period of a dam, internal temperature changes caused by cement hydration heat can easily lead to structural cracking, affecting its long-term stability and safety. By establishing a numerical model of the dam, the temperature stress and temperature of the dam concrete are analyzed to determine the influence trends of water cooling time, cooling pipe layout, and water staging. The research results show that reducing the spacing between cooling pipes is beneficial for controlling the maximum temperature of the concrete, reducing temperature stress, and improving the crack resistance of the dam body; When selecting the water temperature for the first phase of water supply based on the actual situation of the project site, it is necessary to ensure that the concrete cools down while minimizing the temperature difference near the water pipe to avoid concrete cracking; It is reasonable to control the cooling time of the first phase at 20 days, which can effectively control temperature and stress, balance the risk of cracking, and ensure the long-term stability and safety of the dam structure; It is recommended to carry out mid-term cooling for the concrete poured during the high-temperature stages of summer and autumn before winter, to ensure that the internal temperature of the concrete is minimized without increasing excessive stress in the early stages.

Key words: dam; heat of cement hydration; temperature stress; water cooling; concrete cracking

收稿日期: 2024-07-02

作者简介: 颜亮亮(1988—), 男, 工程师, 本科, 主要从事水利工程建设工作。E-mail: 312333542@qq.com

随着全球水资源和清洁能源需求的日益增长,大坝作为调控水流、发电、防洪及灌溉等多功能水利枢纽,其建设规模和复杂度逐渐增大^[1-2]。水库大坝作为大体积混凝土结构,在施工和运行过程中面临的温度控制难题,一直是工程界关注的重点^[3]。尤其在夏热冬冷的极端气候区域,大坝混凝土内部由于水泥水化热产生的大量热量,加之外界环境温度差的双重作用,极易导致结构内部产生明显的温度梯度,进而引发非均匀的热膨胀和收缩,形成温度应力,导致大坝混凝土出现开裂,不仅会降低结构的耐久性和稳定性,严重时还可能威胁到整个工程的安全运行,增加维护成本,影响使用寿命^[4-5]。大坝常用的温度控制方法,如内部埋设冷却水管,能够一定程度上缓解混凝土温升问题,但面对复杂多变的工程条件和更高的质量要求,通水冷却方式对大坝混凝土温度控制效果影响较大^[6]。

基于此,通过建立大坝数值模型,分析大坝混凝土温度应力和温度受通水冷却时间、冷却管布设方式以及通水分期的影响趋势,为类似工程提供参考和借鉴。

1 工程概况

某水利枢纽工程为大(1)型项目,主要建筑物包括输水系统、上下水库大坝、输水系统等,设计标准为1级建筑物,临时建筑物和次要建筑物设计标准分别为4级和3级。下水库大坝死水位、校核洪水位、正常蓄水位、设计洪水位依次为262.3、305.16、298.3、304.17 m,水库的死库容、总库容量、调节库容依次为802、1252、221万 m^3 。混凝土重力坝为下水库大坝类型,198.2 m为其最低建基面高程,坝顶

高程、坝顶全长、最大坝高分别为198.0、108.2以及225.2 m。为应对突发洪水,大坝泄洪设施设有2个泄洪底孔和2个溢流表孔。

2 大坝温度及抗裂性能受通水冷却方式影响

2.1 建立模型

通过构建坝体有限元模型分析不同桶水冷却方式对大坝温度和应力的影响,设置坝高的2.0倍为建基面以下的基岩厚度,并且上下游方向扩展至坝底宽度的2.0倍。选择实体单元来对坝基岩及坝体进行模拟。坝体上下游方向划分为20层单元,沿铅直方向设置为每层1.0 m的单元层厚,两端单元分布较密,中心区域相对较稀。坝段模型共包括62 155个节点和56 400个单元,其中基岩和大坝坝体单元分别为12 000个和44 400个,图1为具体模型示意图,模型相关参数如表1所示。

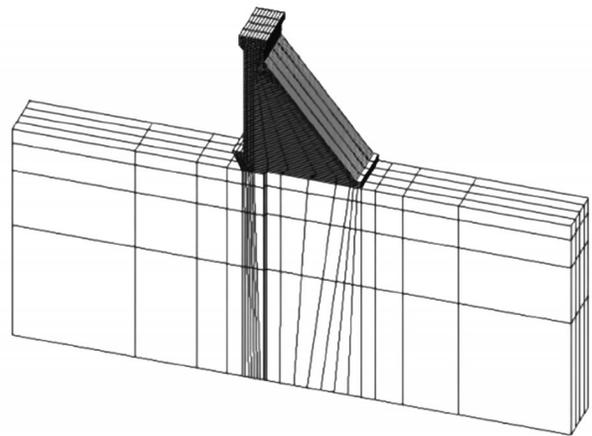


图1 大坝数值模型示意

表1 模型相关参数

参数类别	弹性模量/ GPa	泊松比	比热/ [kJ/(kg·°C)]	线膨胀系数/ ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	容重/ (kg/m^3)	导温系数/ (m^2/d)	导热系数/ [kJ/(kg·d·°C)]	水化热上升 速率/d	绝热 温升/°C
C15三级配 碾压混凝土	24	0.17	0.99	8.5	2 455	0.0725	167.76	2.27	20.0
C20常态垫 层混凝土	27	0.17	0.95	9.0	2 665	0.0739	185.00	1.05	26.5
基岩	15	0.20	0.77	6.0	2 700	0.1754	360.00		

以6月份温度较高时浇筑大坝混凝土为例,分析坝体混凝土温度应力和温度受初期冷却水管排布方式的影响规律。基本工况设置为每层浇筑厚度3.0 m、浇筑温度18 °C、通水冷却时间为20 d、冷

却水温为13 °C、冷却水流量为1.5 m^3/h 、层间间隔为5 d。在此基础上,分析不同基础强约束区的冷却水管排布方式对大坝混凝土温度与温度应力场的影响。冷却水管排布方式共有3种(竖直×水平),分别

为2.0 m×1.5 m、1.5 m×1.5 m以及1.0 m×1.5 m,具体结果如表2所示。

从表2能够发现,混凝土内部温度最大值和顺河向应力最大值在水管间距从1.5 m×1.5 m加密至1.0 m×1.5 m时均呈现出下降趋势,其中温度最大值和顺河向应力最大值分别从26.85 ℃减小至25.55 ℃和从1.55 MPa减少至1.21 MPa,安全系数则由1.81提升至2.31,显示出更强的结构安全性。相反,混凝土内部温度最大值和顺河向应力最大值在水管间距从1.5 m×1.5 m放宽至1.5 m×2.0 m时呈现出上升趋势,温度从26.85 ℃上升到27.72 ℃,顺河向应力最大值从1.55 MPa增长到1.77 MPa,安全系数则相应下降至1.58。由此可见,在基础约束区域内,减小冷却水管的间距有利于更好地控制混凝土的最高温度,减少温度应力,可提升坝体的热应力控制效果和结构安全性能。

2.3 大坝温度应力受冷却水温的影响

在大坝施工过程中,坝体混凝土的温度及随之产生的温度应力场受初期冷却水温的影响较大,对比分析在使用不同一期冷却水温(具体为15 ℃、13 ℃、11 ℃、)时,坝体混凝土内部温度应力场以及温度的变化情况,具体如表3所示。从表3中能够

发现,坝体混凝土温度和温度应力最大值在冷却水温增大2 ℃时分别提高0.5 ℃和0.13 MPa,相应的抗裂安全系数则逐渐减小,分别为1.67、1.81和1.99,大坝开裂风险逐渐增加。这表明,较低的一期冷却水温虽能有效降低混凝土最高温度和应力水平,但初期较低的水温会在水管附近形成较大温度差,导致大坝混凝土开裂。反之,如果冷却水温过高,则会导致温控效果减弱,同样不利于温控防裂措施的实施。因此,需结合工程现场实际情况选择一期通水水温时,在保证混凝土降温的同时,最大程度上减小水管附近温差,避免大坝混凝土开裂,并兼顾施工的可行性和效率,确保大坝建设的质量与安全。

2.4 大坝温度应力受冷却时间的影响

如图2和表4所示为不同一期冷却时长下的大坝混凝土温度应力和温度的变化情况,从图2和表4能够发现一期冷却时间从最初的20 d减少为10 d时,混凝土温度在冷却结束后发生了明显的回弹现象,甚至产生了大于初次温度峰值的二次峰值。这一变化导致强约束区坝体温度最大值从26.85 ℃提高至28.71 ℃,并且顺河向应力最大值在基础温差增大的影响下从1.55 MPa提高到2.02 MPa,而相应

表2 坝体混凝土温度应力受初期冷却水温的影响

一期冷却水温度/ ℃	强约束区冷却水管 布置形式	拉应力最大值			强约束区温度最大 值 / ℃
		安全系数	高程/m	顺河向应力/MPa	
13	2.0 m×1.5 m	1.81	201.1	1.77	27.72
13	1.5 m×1.5 m	1.58	201.1	1.55	26.85
13	1.0 m×1.5 m	2.31	201.1	1.21	25.55

表3 坝体混凝土温度应力受初期冷却水温的影响

一期冷却水温度/ ℃	冷却水管布置形式		安全系数	拉应力最大值		强约束区温度 最大值 / ℃
	弱约束区	强约束区		高程/m	顺河向应力/MPa	
15	2.0 m×2.0 m	1.5 m×1.5 m	1.67	201.1	1.68	27.38
13	2.0 m×2.0 m	1.5 m×1.5 m	1.81	201.1	1.55	26.85
11	2.0 m×2.0 m	1.5 m×1.5 m	1.99	201.1	1.41	26.35

表4 坝体混凝土温度应力受初期冷却时长的影响

一期冷却时长/ d	冷却水管布置形式		安全系数	拉应力最大值		强约束区温度 最大值 / ℃
	弱约束区	强约束区		高程/m	顺河向应力/MPa	
30	2.0 m×2.0 m	1.5 m×1.5 m	2.12	201.1	1.32	26.85
10	2.0 m×2.0 m	1.5 m×1.5 m	1.39	201.1	2.01	28.71
20	2.0 m×2.0 m	1.5 m×1.5 m	1.81	201.1	1.55	26.85

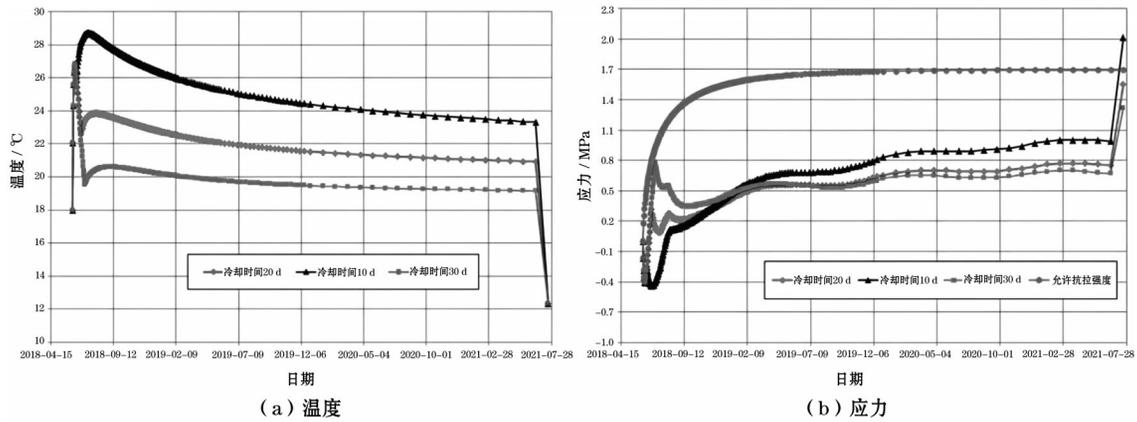


图 2 不同一期冷却时长下的大坝混凝土温度应力和温度的变化情况

的安全系数则从 1.81 减小到 1.39,表明结构安全性有所下降。另一方面,强约束区坝体温度最大值在一期冷却时长从 20 d 延长至 30 d 时基本保持稳定,但顺河向应力最大值减少了约 0.23 MPa,为 1.32 MPa,安全系数也提高到 2.12。延长冷却时长表面上看有利于减少后期的应力积累,但由于早期温度快速下降,导致的应力增大实际上可能增加了混凝土早期开裂的风险。综合以上分析,对于基础约束区域而言,一期冷却时长的选择不宜过长或过短,冷却 20 d 较为合理,既能有效控制温度和应力,

又能平衡好开裂风险,确保大坝结构的长期稳定性和安全性。

2.5 大坝温度应力受通水分期的影响

如图 3 和表 5 所示为不同通水分期下大坝混凝土温度应力和温度的变化情况,能够发现在混凝土龄期 20~30 d 期间增加中期冷却措施,并将水温设定为 20 °C 时,成功抑制了混凝土温度的反弹现象,有效缓解了基础温差的进一步扩大。这一措施在保持强约束区坝体温度最大值稳定在 26.85 °C 的同时,使得顺河向应力最大值从 1.55 MPa 略微减小至

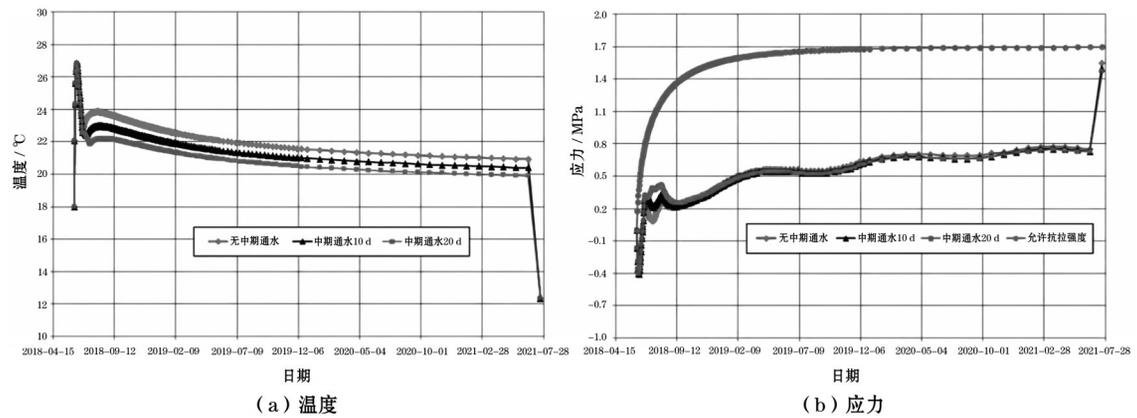


图 3 不同通水分期下大坝混凝土温度应力和温度的变化情况

表 5 坝体混凝土温度应力受初期冷却时长的影响

通水分期 冷却方式	冷却水管布置形式		安全系数	拉应力最大值		强约束区温度 最大值 / °C
	弱约束区	强约束区		高程/m	顺河向应力/MPa	
中冷 20 d	2.0 m×2.0 m	1.5 m×1.5 m	1.90	201.1	1.47	26.85
中冷 10 d	2.0 m×2.0 m	1.5 m×1.5 m	1.87	201.1	1.50	26.85
无中冷	2.0 m×2.0 m	1.5 m×1.5 m	1.81	201.1	1.55	26.85

(下转第 31 页)

其中部分站点埋深变化不大甚至略有下降,反映出该地区地下水补给的复杂性和滞后性。

此次降水对泰州市浅层地下水的影响凸显了极端气候事件对地下水动态的显著干预,同时也揭示了地下水补给的区域异质性和补给机制的复杂性。下阶段针对泰州市地下水资源的管理与保护,应加强对极端气候事件的预判和应对策略,实施分区管理,优化地下水开采与补给策略,充分利用自然降水补给,以期达到地下水位的长期平衡与水源的可持续利用。

(上接第27页)

1.50 MPa,相应的安全系数也从1.81提升到1.87,显示出对结构安全性的正面影响。进一步分析发现,强约束区坝体温度最大值在中期冷却的持续时间从10 d延长至20 d时依旧维持在26.85℃,安全系数进一步提高到1.90,而顺河向应力最大值继续减小至1.47 MPa。因此合理延长中期通水冷时间可以抑制混凝土温度回升幅度,控制混凝土内部温度,减小温度应力。综合考虑,建议对于每年4~9月浇筑的混凝土,在当年10月初合理开展中期冷却,冷却水流量控制在1.2 m³/h以下,水温为18~20℃,以确保在不增加早期阶段过多应力的前提下,最大程度地降低混凝土内部温度,优化整体的温控效果,确保大坝结构的长期稳定性和安全性。

4 结 论

通过建立大坝数值模型,分析大坝混凝土温度应力和温度受通水冷却时间、冷却管布设方式以及通水分期的影响趋势,得出主要结论如下:

(1)减小冷却水管的间距有利于更好地控制混凝土的最高温度,减少温度应力,从而提升坝体的热应力控制效果和结构安全性能;需结合工程现场实际情况选择一期通水水温时,在保证混凝土降温的同时,最大程度上减小水管附近温差,避免大坝

参考文献:

- [1] 陈转兰. 浅论在保护中开发利用浅层地下水[J]. 江苏水利,2008(5):34-39.
- [2] 刘瑞国,王文. 地下水变化与降水的关系分析[J]. 地下水,2009(5):23-27.
- [3] 张坤,张青艳. 河南安阳7.19特大降水对地下水动态的影响[J]. 河南水利与南水北调,2017(1):31-34.
- [4] 崔冬梅. 泰州市水资源利用与经济发展协调分析[J]. 水资源开发与管理,2022(5):22-26.

混凝土开裂。

(2)一期冷却时长不应过长或过短,冷却20 d较为合理,既能有效控制温度和应力,又能平衡好开裂风险,确保大坝结构的长期稳定性和安全性。

(3)合理延长中期通水冷时间可以抑制混凝土温度回升幅度,控制混凝土内部温度,减小温度应力;建议在冬期前对夏秋季高温阶段浇筑的混凝土合理开展中期冷却,确保在不增加早期阶段过多应力的前提下,最大程度地降低混凝土内部温度。

参考文献:

- [1] 赵文剑,黄会宝,陈建康,等. 基于监测数据-变形倾度的瀑布沟大坝坝顶开裂成因分析[J]. 水利规划与设计,2023(5):141-148.
- [2] 王伶俐,任喜平. 日温差对碾压混凝土大坝表面温度应力影响分析[J]. 陕西水利,2023(7):1-4,8.
- [3] 陈聪,孙冬,杨春峰,等. 低温条件下大体积混凝土温控与防裂措施[J]. 水泥工程,2023(3):91-94.
- [4] 王修山,侯宁. 水管冷却对大体积混凝土温度应力的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品,2019(8):15-18.
- [5] 谭海苗,刘阳. 冷却水温对大体积混凝土温度应力的影响[J]. 吉林水利,2023(9):46-49,65.
- [6] 伯芳. 考虑外界温度影响的水管冷却等效热传导方程[J]. 水利学报,2003,34(3):51-56.